

PERFORMANSI SISTEM RADIO OVER FIBER UNTUK 4G DAN 5G

PERFORMANCE OF RADIO OVER FIBER SYSTEM FOR 4G AND 5G

Ripai¹, Kris Sujatmoko², Akhmad Hambali³

^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Telkom University

^{1,2,3} Jalan Telekomunikasi No.1, Terusan Buah Batu, Bandung 40257

¹pairipaitegal@studenttelkomuniversity.ac.id,

²krissujatmoko@telkomuniversity.ac.id, ³ahambali@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Pertumbuhan pada bidang telekomunikasi saat ini berkembang sangat pesat, hal ini disebabkan karena kebutuhan *user* yang menginginkan layanan telekomunikasi yang cepat dengan cakupan yang luas. *Radio Over Fiber* (RoF) merupakan solusi yang ditawarkan karena menyediakan layanan yang cepat dengan *bandwidth* yang besar dan cakupannya yang luas. Pada penelitian ini membuat sistem RoF untuk jaringan 4G dan 5G dengan menggunakan teknik modulasi 4-*Quardature Amplitude Modulation* (QAM) dan menggunakan modulator optik *Lithium Nitroate* (LiNb) *Mach Zehnder Modulator*. Pada simulasi menggunakan jarak lintasan optik 30 Km, 45 Km, dan 60 Km. Hasil performansi sistem RoF dengan jarak terjauh 60 Km mendapatkan nilai *Q-factor* sebesar 6.017 dan BER sebesar 9.463×10^{-10} pada sistem RoF menggunakan frekuensi 2.3 GHz. Pada sistem RoF menggunakan frekuensi 3.5 GHz mendapatkan nilai *Q-factor* sebesar 6.199 dan BER sebesar 2.823×10^{-10} . Pada sistem RoF menggunakan frekuensi 60 GHz mendapatkan nilai *Q-factor* sebesar 6.363 dan BER sebesar 9.758×10^{-11} . Hasil dari ketiga skema masih memenuhi standar nilai *Q-factor* sebesar 6 dan nilai BER 10^{-9} .

Kata Kunci: RoF, QAM, *Q-factor*, BER.

Abstract

The organization in the field of telecommunications is now growing very rapidly, this is due to the needs of users who want a fast telecommunication service with wide coverage. Radio Over Fiber (RoF) is a solution offered because it provides fast service with great bandwidth and wide coverage. This study created an RoF system for 4G and 5G networks using 4-Quadrature Amplitude Modulation (QAM) modulator and using the Mach Zehnder Modulator (LiNb). The simulation uses an optical trajectory of 30 Km, 45 Km, and 60 Km. The performance results of the RoF system with the most distance of 60 Km have a Q-factor value of 6,017 and BER of 9.463×10^{-10} on the RoF system using a frequency of 2.3 GHz. On the RoF system Using a frequency of 3.5 GHz gets a Q-factor value of 6,199 and BER of 2.823×10^{-10} . In the RoF system using the 60 GHz Frekuensi get the Q-factor value of 6,363 and BER of 9.758×10^{-11} . The results of the three schemes still meet the standard Q-factor value of 6 and the value of 10^{-9} .

Keywords: RoF, QAM, *Q-factor*, BER.

1. Pendahuluan

Saat ini teknologi komunikasi berkembang sangat pesat, hal ini disebabkan karena kebutuhan masyarakat yang terus meningkat di bidang telekomunikasi. Untuk memenuhi kebutuhan layanan komunikasi tersebut, masyarakat menggunakan teknologi komunikasi seluler dan teknologi komunikasi optik. Teknologi komunikasi seluler memanfaatkan gelombang radio sehingga dapat mencakup daerah yang luas, tetapi mempunyai performansi yang rendah. Sedangkan dengan teknologi optik, memanfaatkan gelombang cahaya sehingga mempunyai performansi yang tinggi, tetapi cakupannya yang terbatas. *Radio over Fiber* (RoF) merupakan solusi yang ditawarkan karena pada teknologi ini menggabungkan antara gelombang radio dan gelombang cahaya sehingga dapat mencakup daerah yang luas dengan performansi yang tinggi [1].

Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan teknologi RoF pada jaringan 4G dan 5G untuk membandingkan performansi yang berfokus pada kualitas lintasan optik dengan spesifikasi yang akan diterapkan di Indonesia. Perancangan sistem RoF digunakan sebagai acuan secara teknis ketika terjadinya peralihan dari teknologi 4G menuju teknologi 5G. Parameter yang digunakan untuk analisis performansi sistem RoF yaitu berdasarkan nilai *Link Power Budget* (LPB), *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Q-Factor* dan BER. Perancangan jaringan optik untuk teknologi RoF menggunakan *software* optik.

Tugas akhir ini akan membuat perancangan jaringan optik pada sistem RoF untuk 4G menggunakan frekuensi 2.3 GHz. Pada sistem RoF untuk 5G menggunakan frekuensi 3.5 GHz dan 60 GHz. Pada perancangan jaringan RoF menggunakan *bit rate* 10 Gbps. Panjang lintasan optik yang digunakan 30 Km, 45Km dan 60 Km. Parameter pengujian dalam penelitian ini yaitu LPB, SNR, *Q-Factor* dan BER.

2. Dasar Teori

2.1 Radio Over Fiber (RoF)

Radio over Fiber (RoF) merupakan teknologi komunikasi terbaru yang menggabungkan antara jaringan kabel dengan jaringan nirkabel. RoF memanfaatkan jaringan fiber optik yang memiliki performansi tinggi dan menggabungkan dengan komunikasi seluler yang memiliki cakupan luas. Prinsip kerja dari RoF adalah memodulasikan secara bersama antara sinyal gelombang radio yaitu jaringan nirkabel dengan sinyal gelombang cahaya agar dapat ditransmisikan menggunakan kabel fiber optik. Pada pemrosesan sinyal radio dilakukan terpusat pada *Central Base Station* (CBS), sedangkan proses penggunaan fiber optik dilakukan untuk mengirimkan sinyal radio ke *Remote Access Unit* (RAU). Pada RoF akan membuat skema RAU yang terpusat serta penyederhanaan sistem yang bertujuan untuk menghemat biaya operasi dan biaya pemeliharaan sistem. Skema ini mendukung untuk sistem komunikasi *broadband* yang membutuhkan RAU dengan kepadatan tinggi. Pada CBS melakukan proses konversi *electro-optical* (E/O) yaitu merubah sinyal elektrik menjadi sinyal cahaya agar dapat dikirimkan melalui kabel fiber optik. Selanjutnya pada RAU melakukan proses *optoelectronic* (O/E) yaitu merubah sinyal cahaya menjadi sinyal elektrik dengan menggunakan *photodetector* [2].

Pada sistem *Radio Over Fiber* (RoF) mempunyai beberapa keunggulan sehingga dapat mendukung performansi komunikasi seluler, sehingga dapat memenuhi kebutuhan *user* untuk mendapatkan layanan cepat dan cakupannya yang luas. Keunggulan sistem RoF dijelaskan sebagai berikut [3]:

1. *Loss* Rendah
2. *Bandwidth* Besar
3. Alokasi Sumber Daya Dinamis
4. Kebal terhadap Interferensi Gelombang Elektromagnetik
5. Instalasi dan Perawatan Mudah

2.2 Implementasi Radio Over Fiber

Pada *Radio Over Fiber* (RoF) mempunyai keunggulan untuk diimplementasikan pada jaringan seluler karena mempunyai redaman yang rendah, kebal terhadap interferensi dan *bandwidth* yang lebar, sehingga dapat digunakan untuk mendukung jaringan *mobile communication* seperti jaringan 4G dan jaringan 5G. Sistem RoF dapat mendukung untuk performansi yang tinggi karena penggunaan serat optik sehingga sinyal informasi pada gelombang radio ditumpangkan ke dalam sinyal cahaya sehingga meningkatkan kualitas sinyal radio yang akan dipancarkan menggunakan antena. Pada sistem komunikasi 4G yang diperkenalkan oleh 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP) untuk sistem komunikasi *mobile* berdasarkan teknologi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Sistem komunikasi 5G merupakan perkembangan dari teknologi seluler sebelumnya untuk memenuhi kebutuhan *user*. Penggunaan sistem 5G akan menggantikan teknologi sebelumnya yaitu sistem teknologi 4G. Jaringan *wireless* 5G dapat menyediakan kapasitas mencapai 1000 kali lipat dari sebelumnya, meningkatkan koneksi untuk 100 milyar perangkat, dan menyediakan layanan yang cepat mencapai 10 Gbps. Penggelaran jaringan 5G akan dilakukan pada jaringan akses radio yang sudah ada seperti LTE, HSPA, GPRS, dan WiFi bahkan menggunakan akses radio yang baru [4].

2.3 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) merupakan suatu teknik transmisi data yang melewati sejumlah data ke dalam beberapa *subcarrier* sempit yang saling *orthogonal*. OFDM dapat disebut sebagai metode modulasi *multicarrier* atau kombinasi dari modulasi dan *multiplexing*. Pada OFDM menggunakan sejumlah *sub-carrier* berpipa sempit (*narrowband*) yang relatif banyak, berbeda dengan *multicarrier* yang membagi *bandwidth* total dengan pipa yang cukup besar. Pada *Long Term Evolution* (LTE) menggunakan konsep *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) dengan arah *downlink* menggunakan OFDMA dan untuk arah *uplink* menggunakan *Single Carrier - Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) [4].

2.4 Parameter Performansi

Parameter performansi yang akan digunakan dalam Tugas Akhir ini meliputi nilai *Link Power Budget* (LPB), *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Q-factor* dan *Bit Error Rate* (BER). Parameter tersebut akan dijelaskan sebagai berikut [5]:

2.4.1 Link Power Budget (LPB)

Perhitungan *Link Power Budget* (LPB) digunakan untuk menghitung nilai daya terima pada saat pengiriman dari *transmitter* menuju *receiver*. Persamaan untuk perhitungan LPB sebagai berikut :

$$Prx = Ptx + atot \quad (1)$$

$$atotal = L.af + Nc.ac + Ns.as + sp + Ms \quad (2)$$

2.4.2 Signal to Noise Ratio (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) adalah perbandingan antara daya sinyal yang ditransmisikan terhadap daya *noise* yang terjadi pada sistem. Persamaan untuk perhitungan SNR sebagai berikut :

$$SNR = \frac{(P_{TX} \cdot R \cdot M)^2}{2 \cdot q \cdot P_{TX} \cdot R \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B_e + \frac{4Kb \cdot T \cdot B_e}{RL}} \quad (3)$$

2.4.3 Q-Factor

Q-factor merupakan *Signal to Noise Ratio* (SNR) pada *decision circuit* dalam bentuk tegangan arus dan mengetahui kualitas link optik. Persamaan untuk perhitungan *Q-factor* sebagai berikut :

$$Q = \frac{10^{\frac{SNR}{20}}}{2} \quad (4)$$

2.4.4 Bit Error Rate (BER)

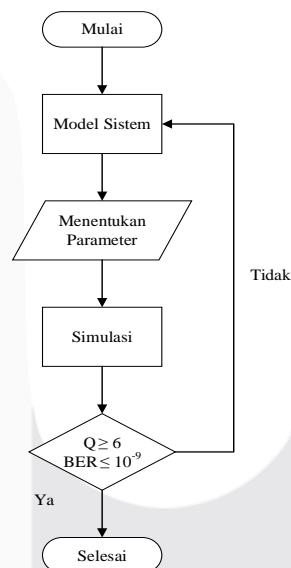
Bit Error Rate (BER) merupakan rasio perbandingan antara bit error dengan keseluruhan bit yang dikirimkan. *BER test* bertujuan untuk mengetahui banyak kesalahan pembacaan yang diterima dalam setiap detik. Persamaan untuk menghitung nilai BER sebagai berikut :

$$BER = \frac{\exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

3. Perancangan Model Sistem

3.1 Diagram Alir

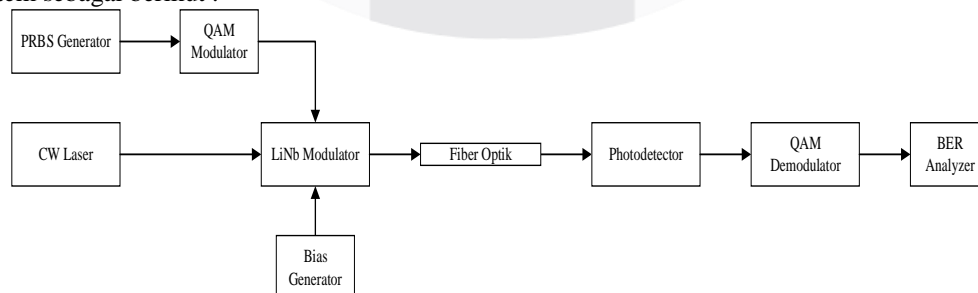
Pada Tugas Akhir ini akan membuat sistem *Radio over Fiber* (RoF). Proses pembuatan sistem akan dilaksanakan berdasarkan diagram alir yang berfungsi untuk menentukan tahapan dalam pembuatan sistem RoF sebagai berikut :



Gambar 1 Diagram alir sistem RoF

3.2 Perancangan Sistem RoF

Pada perancangan sistem RoF menggunakan metode simulasi dengan menggunakan *software* optik dengan model sistem sebagai berikut :



Gambar 2 Blok sistem RoF.

Pada Gambar 3.2 merupakan blok sistem untuk RoF, dimana pada sisi *transmitter* menggunakan *Pseudo Random Bit Generator* (PRBS) untuk membangkit bitnya, sinyal radio akan diproses menggunakan teknik modulasi 4-QAM setelah itu masuk ke LiNb modulator untuk dimodulasikan dengan sumber cahaya berupa laser agar dapat dikirimkan melalui fiber optik. Pada simulasi menggunakan kabel berjenis *Single Mode Fiber* (SMF) yang mempunyai bandwidth besar dan redaman kecil. Pada sisi *receiver*, sinyal cahaya akan dikonversi menjadi sinyal elektrik menggunakan *photodetector* berjenis *Positive Intrinsic Negative* (PIN). Proses memisahkan kembali untuk sinyal radio nya dan kualitas link optik akan dianalisis menggunakan *BER Analyzer*.

3.3 Perhitungan Performansi

3.3.1 Perhitungan Link Power Budget (LPB)

Pada perhitungan *Link Power Budget* (LPB) menggunakan jarak 30 Km. konektor yang digunakan berjumlah 4 Buah dengan nilai redaman 1 dB/buah dan jumlah sambungan 2 Km/sambungan dengan nilai redaman 0.1 dB/sambungan dan nilai *margin system* 6.

Perhitungan untuk attenuasi total :

$$a_{tot} = (30 \times 0.2) + (4 \times 1) + (14 \times 0.1) + 6$$

$$a_{tot} = 17.4 \text{ dB}$$

Perhitungan untuk *power received* yaitu daya kirim dikurangi dengan attenuasi total :

$$P_{rx} = 0 \text{ dBm} - 17.4 \text{ dB}$$

$$P_{rx} = -17.4 \text{ dBm}$$

Hasil tersebut masih memenuhi standar anggaran daya karena nilai LPB $\geq -28 \text{ dBm}$.

3.3.2 Perhitungan Signal to Noise Ratio (SNR)

Perhitungan *Signal to Noise Ratio* (SNR) digunakan untuk membandingkan daya sinyal dengan daya *noise*. Perhitungan untuk SNR sebagai berikut :

$$SNR = \frac{(1.819 \times 10^{-5} \times 0.55 \times 1)^2}{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.819 \times 10^{-5} \times 0.55 \times 1^2 \times 1 \times 10^{10} + \frac{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times 10^{10}}{30}}$$

$$SNR = 25.1 \text{ dB}$$

Nilai untuk SNR yaitu 25.1 dB, sehingga masih memenuhi standar untuk SNR karena $\geq 10.79 \text{ dB}$.

3.3.3 Perhitungan Q-Factor

Perhitungan *Q-factor* digunakan untuk mengetahui faktor kualitas dari lintasan optik . Perhitungan untuk *Q-factor* sebagai berikut :

$$Q = \frac{10^{\frac{25.1}{20}}}{2}$$

$$Q = 8.9$$

Nilai untuk *Q-factor* yaitu 8.9, sehingga masih memenuhi standar untuk *Q-factor* karena ≥ 6 .

3.3.4 Perhitungan Bit Error Rate (BER)

Perhitungan *Bit Error Rate* (BER) digunakan untuk mengetahui perbandingan *bit* yang dikirim dengan *bit* yang *error* . Perhitungan untuk BER sebagai berikut :

$$BER = \frac{\exp(-\frac{8.9^2}{2})}{50\sqrt{2} \times 3.14}$$

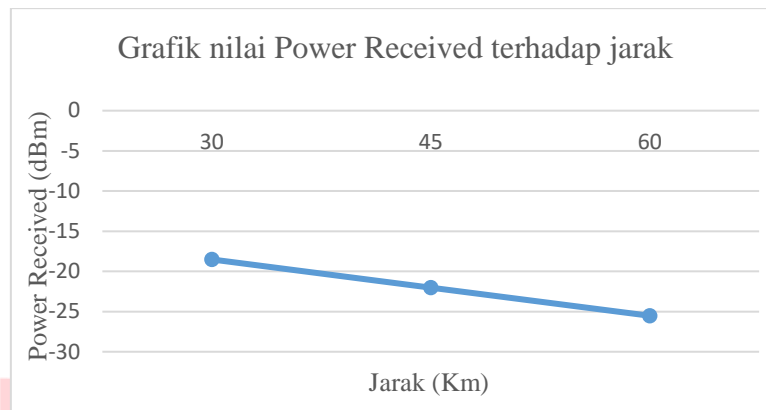
$$BER = 1.19 \times 10^{-19}$$

Nilai untuk BER yaitu 1.19×10^{-19} , sehingga masih memenuhi standar untuk nilai BER karena $\leq 10^{-9}$.

4. Hasil dan Analisis

4.1 Hasil untuk RoF 4G frekuensi 2.3 GHz

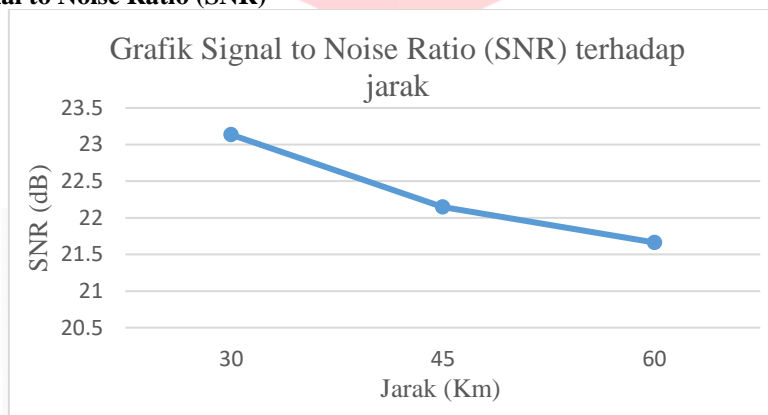
4.1.1 Analisis Link Power Budget (LPB)



Gambar 3 Grafik nilai *power received* terhadap jarak.

Dari hasil simulasi, mendapatkan nilai *power received* yang terbesar pada jarak 30 Km dengan nilai -18.517 dBm. Nilai *power received* pada jarak 45 Km dengan nilai -22.017 dBm. Sedangkan nilai *power received* terendah pada jarak 60 Km dengan nilai -25.517 dBm. Penggunaan jarak mempengaruhi nilai dari *power received* karena semakin panjang jarak yang digunakan maka semakin besar nilai attenuasinya sehingga nilai *power received* semakin kecil.

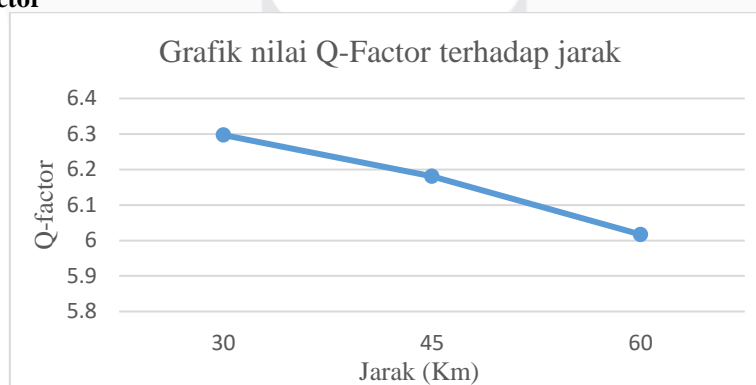
4.1.2 Analisis Signal to Noise Ratio (SNR)



Gambar 4 Grafik SNR terhadap jarak.

Dari hasil simulasi mendapatkan nilai SNR terbesar pada jarak 30 Km dengan nilai 23.135 dB. Hasil SNR pada jarak 45 Km dengan nilai 22.148 dB. Hasil SNR terkecil pada jarak 60 Km dengan nilai 21.763 dB. Pada simulasi menunjukkan bahwa penggunaan jarak mempengaruhi untuk nilai SNR. Semakin panjang jarak yang digunakan maka semakin kecil untuk nilai SNR dan sebaliknya.

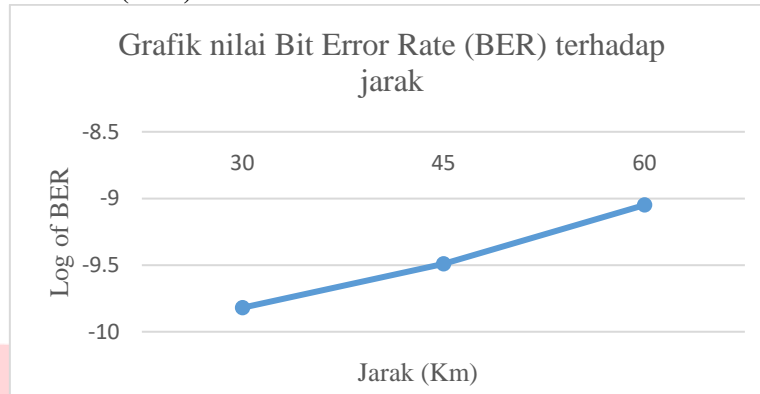
4.1.3 Analisis Q-factor



Gambar 5 Grafik *Q-factor* terhadap jarak.

Hasil simulasi menunjukkan nilai *Q-factor* terbesar pada jarak 30 Km dengan nilai 6.297. Nilai *Q-factor* pada jarak 45 Km dengan nilai 6.181. Sedangkan nilai *Q-factor* terkecil pada jarak 60 Km dengan nilai 6.017. Penggunaan jarak mempengaruhi nilai *Q-factor*, semakin pendek jarak yang digunakan maka nilai *Q-factor* semakin besar dan sebaliknya jika menggunakan jarak yang lebih jauh maka nilai *Q-factor* semakin kecil.

4.1.4 Analisis Bit Error Rate (BER)

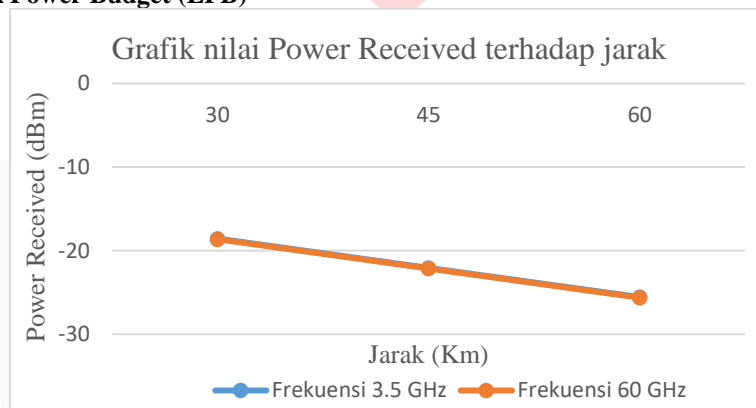


Gambar 6 Grafik BER terhadap jarak.

Hasil simulasi menunjukkan nilai BER terbesar pada jarak 60 Km dengan nilai 9.46372×10^{-10} . Nilai BER pada jarak 45 Km dengan nilai 3.6007×10^{-10} . Sedangkan nilai BER terkecil pada jarak 30 Km dengan nilai 1.14312×10^{-10} . Nilai BER berbanding terbalik dengan dengan *Q-factor*, semakin besar nilai *Q-factor*nya maka semakin kecil nilai BERnya dan jika nilai *Q-factor* semakin kecil maka nilai BER semakin besar.

4.2 Hasil untuk RoF 5G menggunakan frekuensi 3.5 GHz dan 60 GHz.

4.2.1 Analisis Link Power Budget (LPB)



Gambar 7 Grafik power received terhadap jarak.

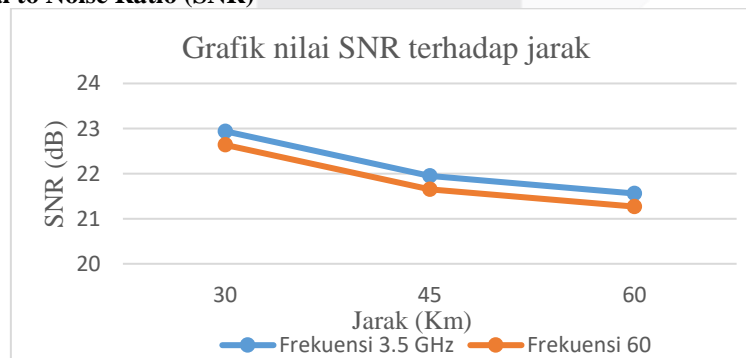
1. Nilai *power received* pada frekuensi 3.5 GHz

Hasil simulasi pada frekuensi 3.5 GHz mendapatkan nilai *power received* yang terbesar pada jarak 30 Km dengan nilai -18.567 dBm. Nilai *power received* pada jarak 45 Km dengan nilai -22.066 dBm. Sedangkan nilai *power received* terendah pada jarak 60 Km dengan nilai -25.566 dBm. Hasil simulasi masih memenuhi anggaran daya pada sistem komunikasi optik.

2. Nilai *power received* pada frekuensi 60 GHz

Hasil simulasi pada frekuensi 60 GHz mendapatkan nilai *power received* yang terbesar pada jarak 30 Km dengan nilai -18.642 dBm. Nilai *power received* pada jarak 45 Km dengan nilai -22.142 dBm. Sedangkan nilai *power received* terendah pada jarak 60 Km dengan nilai -25.642 dBm. Hasil simulasi masih memenuhi anggaran daya pada sistem komunikasi optik.

4.2.2 Analisis Signal to Noise Ratio (SNR)



Gambar 8 Grafik SNR terhadap jarak.

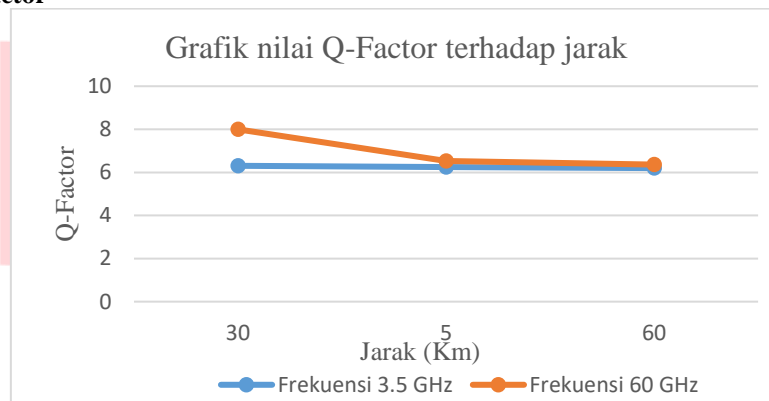
1. Nilai SNR pada frekuensi 3.5 GHz

Hasil simulasi pada frekuensi 3.5 GHz mendapatkan nilai SNR terbesar pada jarak 30 Km dengan nilai 22.94 dB. Hasil SNR pada jarak 45 Km dengan nilai 21.95 dB. Hasil SNR terkecil pada jarak 60 Km dengan nilai 21.56 dB. Hasil simulasi untuk nilai SNR menggunakan *software* optik masih memenuhi standar untuk nilai SNR.

2. Nilai SNR pada frekuensi 60 GHz

Hasil simulasi pada frekuensi 60 GHz mendapatkan nilai SNR terbesar pada jarak 30 Km dengan nilai 22.637 dB. Hasil SNR pada jarak 45 Km dengan nilai 21.651 dB. Hasil SNR terkecil pada jarak 60 Km dengan nilai 21.269 dB. Hasil simulasi untuk nilai SNR menggunakan *software* optik masih memenuhi standar untuk nilai SNR.

4.2.3 Analisis Q-factor



Gambar 9 Grafik *Q-factor* terhadap jarak.

1. Nilai *Q-factor* pada frekuensi 3.5 GHz

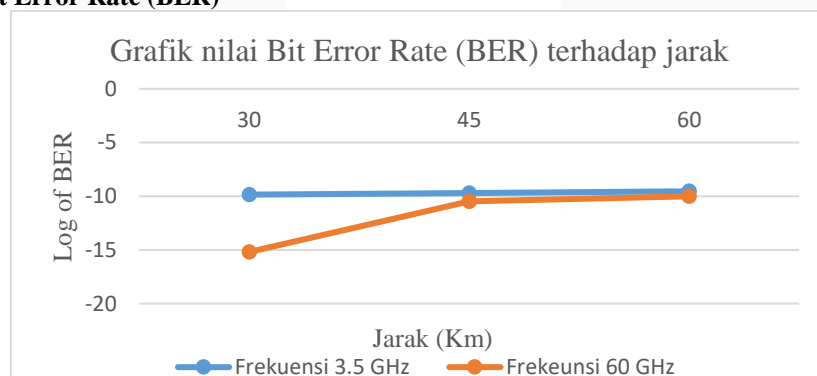
Hasil simulasi pada frekuensi 3.5 GHz mendapatkan nilai *Q-factor* terbesar pada jarak 30 Km dengan nilai 6.306. Nilai *Q-factor* pada jarak 45 Km dengan nilai 6.254. Sedangkan nilai *Q-factor* terkecil pada jarak 60 Km dengan nilai 6.199. Hasil *Q-factor* masih memenuhi standar.

2. Nilai *Q-factor* pada frekuensi 60 GHz

Hasil simulasi pada frekuensi 60 GHz mendapatkan nilai *Q-factor* terbesar pada jarak 30 Km dengan nilai 7.997. Nilai *Q-factor* pada jarak 45 Km dengan nilai 6.531. Sedangkan nilai *Q-factor* terkecil pada jarak 60 Km dengan nilai 6.363. Hasil *Q-factor* masih memenuhi standar.

Dari hasil diatas menunjukan bahwa nilai *Q-factor* pada sistem RoF untuk 5G mendapatkan nilai terbaik pada frekuensi 60 GHz dibandingkan frekuensi 3.5 GHz.

4.2.4 Analisis Bit Error Rate (BER)



Gambar 10 Grafik BER terhadap jarak.

1. Nilai BER pada frekuensi 3.5 GHz

Hasil simulasi pada frekuensi 3.5 GHz mendapatkan nilai BER terbesar pada jarak 60 Km dengan nilai 2.823×10^{-10} . Nilai BER pada jarak 45 Km dengan nilai 1.995×10^{-10} . Sedangkan nilai BER terkecil pada jarak 30 Km dengan nilai 1.427×10^{-10} . Pada sistem komunikasi optik nilai BER maksimal 10^{-9} , sehingga hasil untuk nilai BER pada simulasi memenuhi kualitas standar.

2. Nilai BER pada frekuensi 60 GHz

Hasil simulasi pada frekuensi 60 GHz mendapatkan nilai BER terbesar pada jarak 60 Km dengan nilai 9.758×10^{-11} . Nilai BER pada jarak 45 Km dengan nilai 3.243×10^{-11} . Sedangkan nilai BER terkecil terletak pada jarak 30 Km dengan nilai 6.35×10^{-16} . Pada sistem komunikasi optik nilai BER maksimal 10^{-9} , sehingga hasil untuk nilai BER pada simulasi memenuhi kualitas standar.

Dari hasil diatas menunjukan bahwa nilai BER terkecil pada sistem RoF untuk 5G dengan menggunakan frekuensi 60 GHz dibandingkan frekuensi 3.5 GHz.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis performansi sistem *Radio Over Fiber* (RoF) untuk 4G dan 5G dengan menggunakan variasi jarak dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Performansi untuk sistem RoF untuk 4G mendapatkan nilai terbaik pada jarak 30 Km dengan nilai *Link Power Budget* (LPB) sebesar -18.517 dBm, nilai *Signal to Noise Ratio* (SNR) sebesar 23.135 dB, nilai *Q-Factor* sebesar 6.297 dan nilai *Bit Error Rate* (BER) sebesar 1.513×10^{-10} .
2. Performansi untuk sistem RoF untuk 5G mendapatkan nilai terbaik pada frekuensi 60 GHz pada jarak 30 Km dengan nilai *Link Power Budget* (LPB) sebesar -18.642 dBm, nilai *Signal to Noise Ratio* (SNR) sebesar 22.637 dB, nilai *Q-Factor* sebesar 7.997 dan nilai *Bit Error Rate* (BER) sebesar 6.344×10^{-16} .
3. Penggunaan frekuensi tinggi pada sistem RoF meningkatkan nilai *Q-factor* dan BER.

Daftar Pustaka :

- [1] P. T. Dat, A. Kanno, T. Umezawa, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, "Millimeter- and terahertz-wave radio-over-fiber for 5G and beyond," *Summer Top. Meet. Ser. SUM 2017*, pp. 165–166, 2017.
- [2] A. Achanta, B. A. Rao, S. S. Kandarpa, S. S. S. Sanagapati, K. C. Vishnubhatla, and K. Kumar, "Radio over fiber link design for the fronthaul of cellular communication systems," *11th IEEE Int. Conf. Adv. Networks Telecommun. Syst. ANTS 2017*, pp. 1–4, 2018.
- [3] Xavier N. Fernando, "Radio-over-Fiber-for-Wireless-Communications-From-Fundamentals-to-Advanced-Topics." Canada : Jhon Wiley and Sons Ltd, 2014.
- [4] L. Wardhana, *4G Handbook edisi Bahasa Indonesia*. Jakarta Selatan: www.nulisbuku.com, 2014.
- [5] G. Keiser, *Optical Fiber Communication*, Fifth. Singapore: McGraw-Hill, 2015.